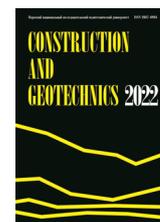




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 14, № 1, 2023

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.1.05

УДК 625.731

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ РАСЧЕТА ДРЕНАЖНЫХ ТРУБ В СЛОЖНЫХ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Ф.Г. Габиров<sup>1</sup>, Х.Б. Салаева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Азербайджанский научно-исследовательский институт строительства и архитектуры, Баку, Азербайджан

<sup>2</sup>Азербайджанский архитектурно-строительный университет, Баку, Азербайджан

### О СТАТЬЕ

Получена: 09 сентября 2022

Одобрена: 10 декабря 2022

Принята к публикации:

6 февраля 2023

#### Ключевые слова:

дренажная труба, грунтовое основание, прочность, деформация, дифференциальное уравнение, внешняя нагрузка, модель, задача.

### АННОТАЦИЯ

Изменения действующих на дренажную трубу (трубопровод) нагрузок в соответствии с относительной способностью деформироваться дренажной трубы и грунтовой засыпки имеют существенное значение. Для определения величины нагрузок на проложенный в траншее дренажный трубопровод наиболее точно соответствует результатам экспериментов и удобна для инженерной практики формула, предложенная А. Марстоном. Перфорация стенок дренажной трубы влияет на их прочность не только при работе труб на раздавливание, но также для условий транспортировки и монтажа труб. Исследовано контактное взаимодействие поперечного сечения дренажной трубы с грунтовым основанием, в этом случае рассматривается взаимодействие цилиндрической (имеющей полукруглый контакт) или релоидной (имеющей контакт сектора круга) оболочек, лежащих на упругом грунтовом основании. Рассмотрено дифференциальное уравнение для описания деформирования упругой оболочки, которое включает параметр жесткости, линейные дифференциальные операторы, компоненты перемещения нейтральной оси дренажной трубы, внешнюю нагрузку и безразмерные координаты. Для моделей упругого основания Э. Винклера и В.З. Власова предложено общее решение дифференциального уравнения, описывающего деформацию дренажной трубы. Решение этого уравнения и внешняя нагрузка представлены в виде двойных или одинарных тригонометрических рядов в зависимости от поставленной задачи (двумерной или одномерной). Рассмотрена горизонтально лежащая цилиндрическая (или релоидная) оболочка (дренажная труба), опертая на грунтовое основание. Контактное давление определяется суммированием коэффициентов Фурье. В данном решении дополнительно учитывается распределительная способность грунтового основания дренажной трубы.

© ПНИПУ

© **Габиров Фахраддин Гасан оглы** – кандидат технических наук, профессор, Азербайджанский научно-исследовательский институт строительства и архитектуры, e-mail: farchad@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-5927-0847

**Салаева Хадиджа Бахруз кызы** – инженер, Азербайджанский архитектурно-строительный университет, e-mail: salayeva\_x@mail.ru

**Fakhraddin G. Gabibov** – Ph. D. in Technical Sciences, Professor, Azerbaijan Research Institute of Construction and Architecture, e-mail: farchad@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-5927-0847

**Khadija B. Salayeva** – Engineer, Azerbaijan University of Architecture and Civil Engineering, e-mail: salayeva\_x@mail.ru

## INVESTIGATION OF INDIVIDUAL PROBLEMS OF CALCULATION OF DRAINAGE PIPES IN COMPLEX GEOTECHNICAL CONDITIONS

F.G. Gabibov<sup>1</sup>, Kh.B. Salaeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Azerbaijan Research Institute of Construction and Architecture, Baku, Azerbaijan

<sup>2</sup>Azerbaijan University of Architecture and Civil Engineering, Baku, Azerbaijan

---

### ARTICLE INFO

Received: 09 September 2022

Approved: 10 December 2022

Accepted for publication:

06 February 2023

#### Keywords:

drainage pipe, ground foundation, strength, deformation, differential equation, external load, model, problem.

### ABSTRACT

The article notes that changes in the loads acting on the drainage pipe (pipeline) in accordance with the relative ability of the drainage pipe and the ground filling to deform are essential. To determine the magnitude of the loads on the drainage pipeline laid in the trench, the formula proposed by A. Marston most accurately corresponds to the results of experiments and is convenient for engineering practice. The perforation of the walls of the drainage pipe affects their strength not only when the pipes are crushed, but also for the conditions of transportation and installation of pipes. The contact interaction of the cross-section of the drainage pipe with the soil base is investigated, in this case, the interaction of cylindrical (having a semicircular contact) or reloid (having a contact of the circle sector) shells lying on an elastic soil base is considered. A differential equation is considered to describe the deformation of an elastic shell, which includes the stiffness parameter, linear differential operators, components of displacement of the neutral axis of the drainage pipe, external load and dimensionless coordinates. For the elastic base models of E.Winkler and V.Z.Vlasov, a general solution of the differential equation describing the deformation of the drainage pipe is proposed. The solution of this equation and the external load is presented in the form of double or single trigonometric series, depending on the task (two-dimensional or one-dimensional). A horizontally lying cylindrical (or reloid) shell (drainage pipe) supported on a ground base is considered. The contact pressure is determined by summing the Fourier coefficients. This solution additionally takes into account the distribution capacity of the ground base of the drainage pipe.

© PNRPU

---

## Введение

Основной нагрузкой на слабонапорные и самотечные дренажные трубы является давление грунта. Также в отдельных случаях необходимо учитывать динамические нагрузки от сейсмических и техногенных воздействий.

Основы расчета на прочность трубопроводов заложенных в грунт изложены в монографиях Р. Прево [1], Л.А. Бабина, Л.И. Быкова и В.Я. Волокова [2], С.В. Виноградова [3], П.П. Бородавкина и А.М. Синюкова [4], А.Н. Богомолова [5], Н.А. Перминова [6] и др.

Разработке конструкций дренажных труб с различным поперечным сечением посвящены исследования С.К. Абрамова, Б.М. Дегтярева и И.В. Коринченко [7], Э.Г. Годеса и Р.М. Нарбута [8], А.Я. Тулаева [9], Г.И. Клиориной [10], А.Д. Ахмедзаде и А.Д. Гашимова [11], Ф.Г. Габибова и Х.Б. Салаевой [12–14] и др.

## Исследования напряженно-деформированного состояния труб горизонтального дренажа

Усилия засыпки на дренажные трубы зависят не только от высоты засыпки  $H$ , ширины траншеи  $B$  или величины наружного диаметра дренажной трубы  $D$  и свойств грунта, но также от деформаций дренажной трубы и окружающего его грунта.

Распределение радиальных давлений по окружности поперечного сечения дренажной трубы из непластичного материала (керамики, бетона, асбестобетона) соответствует обычным представлениям: они возрастают вблизи зон верхних и нижних образующих поперечного сечения, будучи незначительными по боковым зонам. Наоборот, радиальные давления по окружности поперечного сечения дренажных труб из пластичных материалов (полимеры, пластмассы) являются более или менее равномерными, за исключением зоны нижней образующей. В боковых зонах трубы давление в этом случае оказывается даже несколько выше, чем в зоне верхней образующей. Зависимость величины воздействующей на трубу нагрузки от деформируемости трубы и грунта засыпки, установленная М.Г. Шпенглером [15], является очень важной. Когда деформируемость трубы в большей степени, чем деформируемость грунта, на котором она уложена, оказывается близкой к деформируемости грунта засыпки, то передающаяся трубе нагрузка соответствует полному весу грунта над трубой (грунта засыпки). Эта нагрузка уменьшается, если труба является более деформируемой, нежели грунт засыпки; в противном случае нагрузка увеличивается.

Деформация и осадка грунта засыпки приводят к изменению величины действующих в грунте сил внутреннего трения и сцепления, что уменьшает или увеличивает нагрузку на дренажную трубу, вызываемую весом грунта засыпки.

Исходя только из этого обстоятельства очевидно, что изменения действующих на дренажную трубу (трубопровод) нагрузок в соответствии с относительной способностью дренажной трубы и грунтовой засыпки деформироваться имеют существенное значение.

Существует много формул для определения величины нагрузок на проложенный в траншее дренажный трубопровод. Наиболее точно соответствует результатам экспериментов и удобна для инженерной практики формула, предложенная А. Марстоном [16]:

$$Q = k\gamma B^2, \quad (1)$$

где  $Q$  – максимальная нагрузка на дренажную трубу (трубопровод);  $\gamma$  – объемный вес грунта засыпки;  $B$  – ширина траншеи;  $k$  – коэффициент, определяемый из коэффициента осадки  $r_o$ , соотношения  $H/B$ , коэффициента заглубления  $\rho$ , коэффициента внутреннего трения грунта засыпки  $c$ , колебания которого оказывают на нагрузку  $Q$  незначительное влияние.

Для дренажных труб из непластических материалов величина коэффициента осадки  $r_o$  находится в пределах 0,5–0,8.

Для дренажных труб (трубопроводов) из полимерных материалов коэффициент  $r_o$  находится в пределах 0,1–0,8 и зависит от степени сжимаемости в пазухах грунта засыпки. Дренажные гидротехнические трубы укладываются на глубину, превосходящую величину их диаметра, в этом случае коэффициент осадки  $r_o$  принимает отрицательное значение.

Для удобства определения коэффициента  $k$  предложен специальный график (рис. 1).

Формула А. Марстона позволяет определить величину максимальной нагрузки  $Q$ , которая возникает в грунтовой засыпке траншеи на уровне верхней образующей дренажной трубы.

Согласно формуле (1) нагрузка  $Q$  является функцией (рис. 2): объемного веса грунта засыпки  $\gamma$ ; ширины траншеи  $B$ ; соотношения  $H/B$  и коэффициента  $k$ .

Процесс разрушения полимерных дренажных и коллекторных труб происходит последовательными стадиями, изображенными на рис. 3. Этот процесс начинает проявляться, когда под действием чрезмерной деформации боковые стенки дренажной трубы перестают раздвигаться, в то время как пластическая критическая деформация дренажной трубы происходит все более быстрыми темпами.

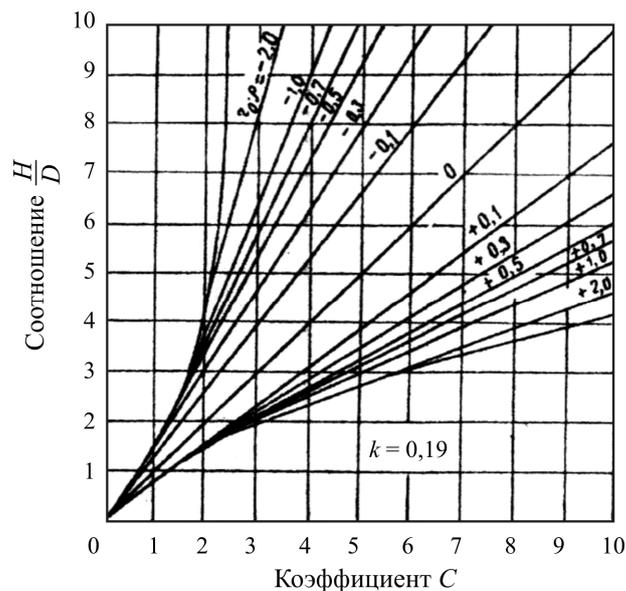


Рис. 1. График кривых зависимости коэффициента  $k$  от отношения  $H/D$  для нагрузок, вызванных грунтовой засыпкой (по Breitfuss)

Fig. 1. Graph of the curves of the coefficient  $k$  dependence on the  $N/D$  ratio for loads caused by ground filling (according to Breitfuss)

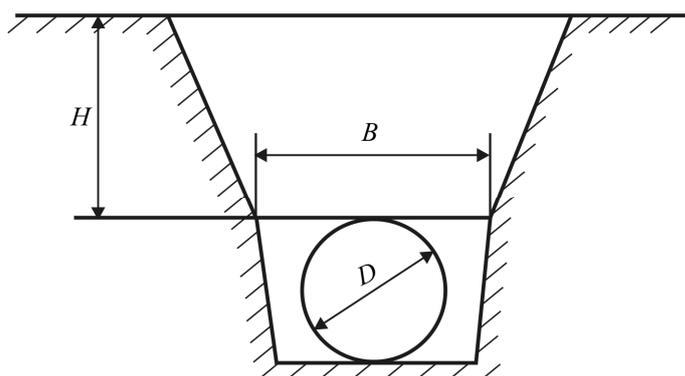


Рис. 2. Расчетная схема для определения максимальной нагрузки на дренажный трубопровод (по А. Марстону)

Fig. 2. Calculation scheme for determining the maximum load on the drainage pipeline (according to A. Marston)

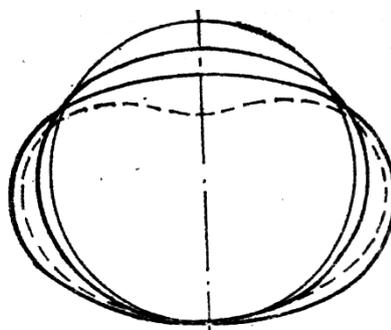


Рис. 3. Последовательные стадии деформирования дренажной трубы из полимерного материала

Fig. 3. Successive stages of deformation of a drainage pipe made of polymer material

Экспериментально выявлено, что разрушение полимерных труб происходит при уменьшении вертикального диаметра примерно на 20 %. Эта величина не зависела от диаметра и толщины труб, а также от сопротивления грунта.

Дренажные трубы рассчитываются на прочность так же, как любые другие трубы, уложенные в грунте. Методы расчета таких труб достаточно подробно изложены в работах [3, 17].

Вместе с тем расчет дренажных труб, особенно стандартных малого диаметра, имеет некоторые особенности.

Фильтрующая обсыпка, окружающая дренажную трубу, определяет, с одной стороны, способ опирания трубы на основание, с другой стороны, величину бокового давления грунта на трубу. Как правило, рыхлая фильтрующая обсыпка обеспечивает достаточно хорошее сопряжение трубы с основанием. Величину бокового давления на трубу следует определять в зависимости от физико-технических показателей фильтрующей обсыпки, а не грунта обратной засыпки.

При расчете дренажных труб необходимо учитывать влияние водоприемных отверстий (перфорации) на их прочность.

Для перфорированных стандартных труб величина разрушающей нагрузки  $P_p^{\Pi}$  может быть определена по следующей формуле

$$P_p^{\Pi} = P_p K_p, \quad (2)$$

где  $P_p^{\Pi}$  – величина разрушающей нагрузки;  $K_p$  – коэффициент снижения прочности труб в результате перфорации в продольном сечении.

Коэффициент  $K_p$  представляет собой отношение моментов сопротивления стенки перфорированной и неперфорированной труб. Его можно определить по формуле

$$K_p = 1 - \frac{t_o}{C_o}, \quad (3)$$

где  $t_o$  – размер перфорации в продольном сечении трубы;  $C_o$  – расстояние между отдельными перфорационными отверстиями в продольном сечении трубы.

Если перфорация равномерно распределена по всей поверхности дренажной трубы, то коэффициент  $K_p$  можно определять по следующей формуле:

$$K_p = 1 - \sqrt{\frac{\lambda_o}{\lambda_p} \cdot \frac{\delta_p}{\delta_o}} \eta, \quad (4)$$

где  $\lambda_o = \frac{t_o}{t_p}$ ;  $\lambda_p = \frac{C_o}{C_p}$ ;  $\delta_o = \frac{\omega_o}{t_o t_p}$ ;  $\lambda_p = \frac{1}{1 + n_p}$ ;

$t_p$  – размер перфорации в поперечном сечении трубы;  $C_p$  – расстояние между отдельными перфорационными отверстиями в поперечном сечении трубы;  $\omega_o$  – площадь отдельной перфорации;  $n_p$  – количество промежуточных рядов отверстий в диапазоне  $C_p$ ;  $\eta$  – скважность поверхности трубы.

Перфорация стенок дренажной трубы влияет на их прочность не только при работе труб на раздавливание, но также для условий транспортировки и монтажа труб. Снижение прочности дренажной трубы в этом случае можно учесть коэффициентом  $K_m$ , представ-

ляющим отношение моментов сопротивления поперечного сечения перфорированной и неперфорированной трубы, который можно определить по формуле

$$K_M = 1 - \frac{t_p}{c_p}. \quad (5)$$

Давление, передаваемое через грунт на жесткие дренажные трубофильтры, зависит от свойств и состояния грунта, геометрических размеров траншеи, способа укладки трубы на грунтовое основание, наличия или отсутствия вокруг трубы рыхлой обсыпки и других факторов, которые часто трудно поддаются расчету.

Г.М. Джафаровым [18] установлено, что давление на оболочку жесткой трубы, уложенной в траншее на песчаную подготовку, распределяется неравномерно. Максимальное давление возникает в точках пересечения вертикального диаметра с оболочкой трубы, затем оно убывает и в точках пересечения горизонтального диаметра с оболочкой трубы доходит до минимума.

При учете влияния грунтового основания минимальные давления перемещаются в граничные точки опирания трубы на грунтовое основание. С учетом несущей способности бетонных труб предельная внешняя нагрузка на дренажные трубофильтры может быть выражена формулой, предложенной Г.К. Клейном [19]:

$$\alpha Q r_{cp} = \frac{R_p \ell h^2}{3,5 \psi_{BH}}, \quad (6)$$

где  $Q$  – равнодействующая вертикальных давлений на 1 м трубы;  $\alpha$  – коэффициент, выражающий влияние интенсивности распределения реакций на опорной поверхности трубы (при наличии фильтрующей обсыпки  $\alpha = 0,09$ , а при отсутствии фильтрующей обсыпки  $\alpha = 0,12$ );  $h$  – толщина стенки трубофильтра;  $r_{cp}$  – средний радиус трубы;  $\ell$  – длина трубофильтра;  $R_p$  – предел сопротивления бетона растяжению;  $\psi_{BH}$  – коэффициент, учитывающий кривизну сечения трубофильтра.

Учитывая опыт расчета труб в земле и специфику нагрузок на дренажные трубы, для определения расчетных нагрузок от давления грунта на трубофильтры, расположенные в траншее, можно применять следующие формулы при укладке трубофильтров:

– без фильтрующей обсыпки

$$P = nk_{TP} \gamma g BH; \quad (7)$$

– с фильтрующей обсыпкой

$$P = nk_{TP} \gamma g BH \lambda, \quad (8)$$

где  $n$  – коэффициент перегрузки;  $\gamma$  – объемный вес грунта;  $H$  – глубина траншеи до верха трубофильтра;  $B$  – ширина траншеи на уровне верха трубофильтра;  $k_{TP}$  – коэффициент вертикального давления в траншее, зависящий от отношения  $H/B_c$  (здесь  $B_c$  – ширина траншеи на глубине  $H/2$ );  $g$  – ускорение свободного падения.

Значение  $\lambda$  находится по формуле

$$\lambda = a \frac{D}{B} + b, \quad (9)$$

где  $D$  – наружный диаметр трубофильтра;  $a$  и  $b$  – коэффициенты, выражающие влияние фильтрующей обсыпки на свойства грунтов (в среднем  $a = 0,1$  и  $b = 0,6$ ).

## Исследование контактного взаимодействия поперечного сечения дренажной трубы с грунтовым основанием

Рассмотрим контактное взаимодействие поперечного сечения дренажной трубы с грунтовым основанием. В этом случае рассматривается взаимодействие цилиндрической (имеющей полукруглый контакт) или релоидной (имеющей контакт сектора круга) оболочек, лежащих на упругом грунтовом основании.

Пусть известно дифференциальное уравнение для описания деформирования упругой оболочки:

$$DL_1w = L_2F, \quad (10)$$

где  $D$  – параметр жесткости;  $L_1$  и  $L_2$  – линейные дифференциальные операторы, вид которых определяется принимаемой теорией расчета рассматриваемой упругой системы;  $w(\alpha_1, \alpha_2)$  – компоненты перемещения (прогиб) серединой поверхности или нейтральной оси;  $F(\alpha_1, \alpha_2)$  – внешняя нагрузка;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – безразмерные координаты.

При взаимодействии цилиндрической (релоидной) оболочки с упругой деформируемой грунтовой средой (упругим основанием) внешняя нагрузка в  $i$ -й области контакты  $\Omega_i$  определяется формулой

$$F = Q - \bar{p}, \quad (11)$$

где  $Q$  – заданная внешняя нагрузка;  $\bar{p}$  – реактивная нагрузка в области  $\Omega_i$ , выражение для которой зависит от модели грунтового основания:

$$\bar{p} = L_3w, \quad (12)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, N$ ;  $N$  – число областей контактов; вне зоны контакта  $F = Q$ .

Для упругого основания Э.Винклера [20] и В.З.Власова [21] соответственно имеем

$$\bar{p} = c_iw, \quad (13)$$

$$L_3 = c_{1i} - c_{2i} \frac{\partial^2}{\partial \alpha_2^2}, \quad (14)$$

где  $c_i$  – коэффициент постели упругого грунтового основания; для упругого слоя конечной жесткости:

$$c_{1i} = \frac{E}{H(1-\nu^2)}; \quad (15)$$

$$c_{2i} = \frac{EH}{6(1+\nu)}, \quad (16)$$

где  $E$  – модуль упругости грунта основания;  $\nu$  – коэффициент Пуассона грунта основания;  $H$  – толщина грунтового слоя основания.

Общее решение уравнения (10) ищем в виде

$$w = w_1 + w_2, \quad (17)$$

где  $w_1$  – известное решение однородного уравнения  $DL_1 w_1 = 0$  для свободной от нагрузки упругой системы;  $w_2$  – решение неоднородного уравнения  $DL_1 w_2 = L_1 F$ , определяемое характером нагружения системы и моделью для описания контактного взаимодействия. Решение этого уравнения и внешнюю нагрузку представим в виде двойных или одинарных тригонометрических рядов в зависимости от постановки задачи (двумерной или одномерной):

$$w_2 = \sum_m^{\infty} \sum_n^{\infty} w_{2mn} \psi_{1m}(\alpha_1) \psi_{2n}(\alpha_2); \quad (18)$$

$$F = \sum_m^{\infty} \sum_n^{\infty} F_{mn} \psi_{1m}(\alpha_1) \psi_{2n}(\alpha_2), \quad (19)$$

где  $\psi_{1m}(\alpha_1)$ ,  $\psi_{2n}(\alpha_2)$  – тригонометрические функции;

$$F_{mn} = Q_{mn} - p_{mn}; \quad (20)$$

$$Q_{mn} = \frac{4}{T_{\alpha_1} T_{\alpha_2}} \iint_{\Omega} Q(\alpha_1, \alpha_2) \psi_{1m}(\alpha_1) \psi_{2n}(\alpha_2) d_{\alpha_1} d_{\alpha_2}; \quad (21)$$

$$p_{mn} = \frac{4}{T_{\alpha_1} T_{\alpha_2}} \sum_i^N \iint_{\Omega} L_3(w_1 + w_2) \psi_{1m}(\alpha_1) \psi_{2n}(\alpha_2) d_{\alpha_1} d_{\alpha_2}, \quad (22)$$

$T_{\alpha_1}$  и  $T_{\alpha_2}$  – периоды раскладывания функций соответственно по  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ;  $\Omega$  – поверхность упругой системы.

После постановки выражений (18) и (19) в исходное дифференциальное уравнение получим

$$A_{mn} w_{2mn} + \sum_{t \neq m}^{\infty} \sum_{k \neq n}^{\infty} a_{mntk} w_{2tk} + p_{mn} = Q_{mn}, \quad (23)$$

где

$$A_{mn} = \frac{D_{\alpha_1} \psi_{1m}(\alpha_1) \psi_{2n}(\alpha_2)}{\alpha_2 \psi_{1m}(\alpha_1) \psi_{2n}(\alpha_2)} + \frac{4}{T_{\alpha_1} + T_{\alpha_2}} \sum_{i=1}^N \iint_{\Omega} L_3[\psi_{1m}(\alpha_1) \psi_{2n}(\alpha_2)] \psi_{1m}(\alpha_1) \psi_{2n}(\alpha_2) d_{\alpha_1} d_{\alpha_2}; \quad (24)$$

$$a_{mntk} = \frac{4}{T_{\alpha_1} + T_{\alpha_2}} \sum_{i=1}^N \iint_{\Omega} L_3[\psi_{1m}(\alpha_1) \psi_{2n}(\alpha_2)] \psi_{1m}(\alpha_1) \psi_{2k}(\alpha_2) d_{\alpha_1} d_{\alpha_2}; \quad (25)$$

$$p_{mn} = \frac{4}{T_{\alpha_1} + T_{\alpha_2}} \sum_{i=1}^N \iint_{\Omega} L_3(w_1) \psi_{1m}(\alpha_1) \psi_{2n}(\alpha_2) d_{\alpha_1} d_{\alpha_2}. \quad (26)$$

Добавляя к (23) уравнения равновесия системы как твердого тела и условия на ее границах ( $\alpha_1 = \alpha_{10}$ ,  $\alpha_2 = \alpha_{20}$ )

$$\iint_{\Omega} F d\Omega = 0; \quad (27)$$

$$\iint_{\Omega} [F \cdot S] d\Omega = 0; \quad (28)$$

$$L_4 w(\alpha_{10}, \alpha_{20}) = \sigma_i^o, \quad (29)$$

получаем разрешающее соотношение изгиба упругой системы при локальном взаимодействии с деформируемой средой в виде бесконечной системы линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов Фурье перемещения  $w_2$  и постоянных интегрирования однородного уравнения

$$[A]W + Q, \quad (30)$$

где  $[A]$  – квадратная матрица жесткости;  $W$  – вектор-столбец искомых величин;  $Q$  – вектор-столбец заданных внешних нагрузок.

Если  $w_2$  удовлетворяет граничным условиям, то  $w_1 = 0$ ,  $p_{mn} = 0$  и (30) принимает вид

$$A_{mn} w_{2mn} + \sum_{t \neq m} \sum_{k \neq n} a_{mntk} w_{2mn} = Q_{mn}. \quad (31)$$

Анализ системы уравнений (30) и (31) показывает, что диагональные элементы матриц указанных систем являются главными элементами и с увеличением номеров гармоник  $m$  и  $n$  существенно возрастают. Начиная с некоторых значений  $m = m_*$ ,  $n = n_*$  они значительно превосходят недиагональные элементы и при  $m > m_*$ ,  $n > n_*$ :

$$w_{2mn} \approx Q_{mn} A_{mn}^{-1}. \quad (32)$$

Поэтому бесконечные системы линейных алгебраических уравнений (30) и (31) можно редуцировать, заменив их конечными системами из  $m_* \cdot n_*$  уравнений, и решение неоднородного уравнения представить в виде

$$w_2(\alpha_1, \alpha_2) = \sum_{m=1}^{m_*} \sum_{n=1}^{n_*} w_{2mn} \psi_{1m}(\alpha_1) \psi_{2n}(\alpha_2) + \sum_{m_*+1}^{\infty} \sum_{n_*+1}^{\infty} Q_{mn} A_{mn}^{-1} \psi_{1m}(\alpha_1) \psi_{2n}(\alpha_2). \quad (33)$$

Если коэффициенты Фурье  $Q_{mn}$  с увеличением  $m$  и  $n$  убывают, то вторым слагаемым в (33) можно пренебречь. Значения чисел  $m_*$  и  $n_*$ , характеризующих порядок редуцированной системы уравнений (30), зависят от соотношений жесткости упругой оболочки дренажной трубы и контактирующей с ней грунтовой среды основания.

Полученные разрешающие системы линейных алгебраических уравнений (30) хорошо обусловлены. Данный подход к расчету хорошо реализуется на компьютере.

Рассмотрим горизонтально лежащую цилиндрическую (или релоидную) оболочку (дренажную трубу), опертую на грунтовое основание. Контакт нижней полукруглой или секторной поверхности дренажной трубы с грунтовым основанием имеет угол охвата  $\varphi$ . Двусторонний контакт между дренажной трубой и грунтовым основанием показан на рис. 4.

Радиальную деформацию контактной части дренажной трубы и радиальную нагрузку на основание определяем в результате решения контактной задачи в виде тригонометрического ряда

$$w(\varphi), p(\varphi) = \sum_0^{\infty} (w_{cn}, p_{cn}) \cos n\varphi + (w_{sn}, p_{sn}) \sin n\varphi. \quad (34)$$

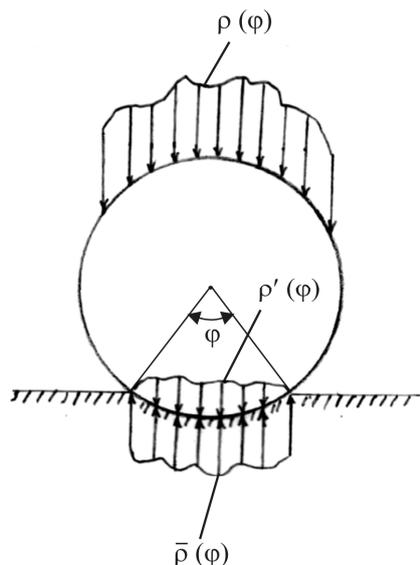


Рис. 4. Схема контактного взаимодействия дренажной трубы с грунтовым основанием  
 Fig. 4. The scheme of contact interaction of the drainage pipe with the ground base

Радиальные нагрузки и перемещения являются кусочно-непрерывными на всем интервале изменения  $\varphi$ , поэтому тригонометрические ряды сходятся абсолютно и равномерно.

Усилие для принятой модели грунтового основания

$$\bar{p}(\varphi) = k_1 w(\varphi) - k_2 w(\varphi), \quad (35)$$

или

$$\bar{p}(\varphi) = p(\varphi) - p'(\varphi), \quad (36)$$

где  $k_1 = k$ ;  $k_2 = 2tR^{-2}$ ;  $p'(\varphi)$  – нагрузка, действующая в месте контакта дренажной трубы и грунтового основания.

Каждому члену разложения  $p_{cn}$  и  $p_{sn}$  соответствует определенное напряженно-деформированное состояние в кольце поперечного сечения дренажной трубы:

$$w_n = \alpha_n (n p_n + \tau_n); \quad (37)$$

$$\alpha_o = R^2 \left[ EF \left( 1 + \sum_m \beta_o \right) \right]^{-1}; \quad (38)$$

$$\alpha_n = R^4 \left[ EI_n (n^2 - 1)^2 \left( 1 + \sum_m \beta_n \right) \right]^{-1}. \quad (39)$$

Коэффициенты  $p_{c1}$  и  $p_{s1}$  равны нулю, так как главный вектор сил, приложенных в сечении дренажной трубы, равен нулю. Коэффициенты  $\beta_n$  определяются в результате совместного рассмотрения деформирования оболочки дренажной трубы и грунтового основания.

Рассмотрим грунтовое основание с секторным (не доходящим до полукруга) контактом с дренажной трубой (см. рис. 4). Здесь получим две отдельные системы уравнений для определения  $p_{cn}$ ,  $w_{cn}$ ,  $p_{sn}$ ,  $w_{sn}$ :



радиального прогиба в зависимости от параметров конструкции трубы, грунтового основания и внешней нагрузки.

Контактное давление определяется суммированием коэффициентов Фурье. Контактное давление более удобно вычислять по формуле

$$\bar{p}(\varphi) = -k_1 \sum_{n=0}^{n_s} \left( 1 + n^2 \frac{k_2}{k_1} \right) (w_{cn} \cos n\varphi + w_{sn} \sin n\varphi). \quad (56)$$

Уравнение (56) формируется, так как ряд для  $w(\varphi)$  сходится значительно быстрее ( $w_n \sim p_n n^{-1}$ ). В данном решении дополнительно учитывается распределительная способность грунтового основания дренажной трубы.

Опуская в приведенных уравнениях члены, содержащие  $k_2$ , получаем решения контактных задач для модели Э. Винклера.

## Заключение

1. Изменения действующих на дренажную трубу (трубопровод) нагрузок в соответствии с относительной способностью дренажной трубы и грунтовой засыпки деформироваться имеют существенное значение.

2. Для определения величины нагрузок на проложенный в траншее дренажный трубопровод наиболее точно соответствует результатам экспериментов. Для инженерной практики удобна формула, предложенная А. Марстоном.

3. Исследовано контактное взаимодействие поперечного сечения дренажной трубы с грунтовым основанием, в этом случае рассматривается взаимодействие цилиндрической (имеющей полукруглый контакт) или релоидной (имеющей контакт сектора круга) оболочек, лежащих на упругом грунтовом основании.

4. Рассмотрено дифференциальное уравнение для описания деформирования упругой оболочки, которое включает параметр жесткости, линейные дифференциальные операторы, компоненты перемещения нейтральной оси дренажной трубы, внешнюю нагрузку и безразмерные координаты.

5. Для моделей упругого основания Э. Винклера и В.З. Власова предложено общее решение дифференциального уравнения, описывающего деформацию дренажной трубы. Решение этого уравнения и внешняя нагрузка представлено в виде двойных или одинарных тригонометрических рядов в зависимости от поставленной задачи (двумерной или одномерной).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

## Библиографический список

1. Прево Р. Расчет на прочность трубопроводов, заложенных в грунт. – М.: Стройиздат, 1964. – 123 с.
2. Бабин Л.А., Быков Л.И., Волохов В.Я. Типовые расчеты по сооружению трубопроводов. – М.: Недра, 1979. – 176 с.

3. Виноградов С.В. Расчет подземных трубопроводов на внешние нагрузки. – М.: Стройиздат, 1980. – 135 с.
4. Бородавкин П.П., Синюков А.М. Прочность магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1984. – 245 с.
5. Богомоллов А.Н, Богомоллова О.А, Ушаков А.Н. Об определении напряжений на контурах подземных горизонтальных выработок, подверженных всестороннему равномерному давлению // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 10, № 2. – С. 36–55. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.2.04
6. Перминов Н.А. Моделирование и мониторинг конструкционной безопасности уникальных подземных сооружений системы водоотведения крупных городов в сложных грунтовых условиях // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2021. – Т. 12, № 1. – С. 30–45. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.03
7. Абрамов С.К., Дегтярев Б.М., Коринченко И.В. Горизонтальные дренажи с трубофильтрами из пористого бетона. – М.: Стройиздат, 1976. – 80 с.
8. Годес Э.Г., Нарбут Р.М. Строительство в водной среде: справочник. – Л.: Стройиздат, 1989. – 527 с.
9. Тулаев А.Я. Осушение земляного полотна городских дорог. – М.: Стройиздат, 1983. – 132 с.
10. Клиорина Г.И. Дренажи в инженерной подготовке и благоустройстве территории застройки. – М.: Издательство АСВ; СПб.: СПбГАСУ, 2000. – 147 с.
11. Ахмедзаде А.Д., Гашимов А.Д. Теоретические и практические основы мелиорации засоленных земель. – Баку: АзНИИГиМ, 2019. – 428 с.
12. Габибов Ф.Г., Салаева Х.Б. Исследование конструкций дренажных труб с геометрией, альтернативной круглому сечению, и разработка инновационных вариантов // Закономерности трансформации экологических функций геосфер крупных горнопромышленных регионов: сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель: Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, 2022. – С. 87–92.
13. Габибов Ф.Г., Салаева Х.Б. Исследование, анализ и доработка конструкций круглых дренажных труб с конструктивными дополнениями для развития их отдельных функций // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сб. ст. XXII Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2022. – С. 38–48.
14. Габибов Ф.Г., Салаева Х.Б. Инженерный анализ круглых дренажных труб и дополняющих их технических элементов в конструкциях горизонтального дренажа // Недра Калмыкии уникальны и интересны: материалы XII Нац. науч.-практ. конф. – Элиста: Изд-во Калмыцкого ун-та, 2022. – С. 173–182.
15. Spangler M.G. Structural design of flexible pipe culverts // Bull. – 1941. – № 153. – IEES.
16. Marston A. The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments // Bull. – 1930. – № 96. – IEES.
17. Клейн Г.К. Расчет труб, уложенных в земле. – М.: Госстройиздат 1957. – 196 с.
18. Джафаров Г.М. Исследование интенсивности распределения реакций по опорной поверхности и ее влияния на напряженное состояние дренажных труб // Труды Азербайджанского НИИ водных проблем. – Баку, 1968. – Вып. 1.
19. Клейн Г.К. Расчет подземных трубопроводов. – М.: Стройиздат, 1969. – 240 с.
20. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984. – 679 с.

21. Власов В.З., Леонтьев Н.Н. Балки, плиты и оболочки на упругом основании. – М.: Физматгиз, 1960. – 491 с.

## References

1. Prevo R. Raschet na prochnost truboprovodov, zalozhennih v qrunt. [Calculation of the strength of pipelines embedded in the ground]. Moscow, Strojizdat, 1964, 123 p.
2. Babin L.A., Bikov L.I., Volochov V.Y. Tipoviye rascheti po sooruzheniyu truboprovodov. [Typical calculations for the construction of pipelines]. Moscow, Nedra, 1979, 176 p.
3. Vinogradov S.V. Raschet podzemnih truboprovodov na vneshniye nagruzki. [Calculation of underground pipelines for external loads]. Moscow, Strojizdat, 1980, 135 p.
4. Borodavkin P.P., Sinyukov A.M. Prochnost magistralnih truboprovodov. [Strength of main pipelines]. Moscow, Nedra, 1984, 245 p.
5. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Ushakov A.N. On the determination of stresses on the contours of underground horizontal mines, subject to an overall uniform pressure. *Vestnik Permskogo natsional'no issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2019, vol. 10, iss. 2, pp. 35-55. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.2.04
6. Perminov N.A. Modelling and monitoring of structural safety of unique underground structures of the sewage system of large cities in difficult ground conditions. *Construction and Geotechnics*, 2021, vol. 12, iss. 1, pp. 30-45. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.03
7. Abramov S.K., Degtyarev B.M., Korinchenko I.V. Gorizontalniye drenazhi s trubofiltrami iz poristogo betona. [Horizontal drains with porous concrete pipefilters]. Moscow, Strojizdat, 1976, 80 p.
8. Godes E.G., Narbut R.M. Stroitelstvo v vodnoy srede: Spravochnik. [Construction in the aquatic environment: A reference guide]. Leningrad, Strojizdat, Leningrad office, 1989, 527 p.
9. Tulayev A.Y. Osushestvleniye zemlyanogo polotna gorodskikh dorog. [Drainage of the roadbed of urban roads]. Moscow, Strojizdat, 1983, 132 p.
10. Kliorina G.I. Drenazhi v inzhenernoy podgotovke i blagoustroystve territorii zastroyki. [Drains in engineering preparation and landscaping of the building area]. Moscow, Izdatelstvo ASV, Sankt-Peterburg, SPbGASU, 2000, 147 p.
11. Achmedzade A.D., Gashimov A.D. Teoreticheskiye i prakticheskiye osnovy melioratsii zasolennykh zemel. [Theoretical and practical foundations of saline land reclamation]. Baku, AzNIIGiM, 2019, 428 p.
12. Gabibov F.G., Salayeva Kh.B. Issledovaniye konstruktsiy drenazhnykh trub s geometriyey, alternativnoy kruglomu secheniyu, i razrabotka innovatsionnykh variantov [Investigation of drainage pipe designs with geometry alternative to round section and development of innovative options] *Sbornik materialov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii konferentsii "Zakonomernosti transformatsii ekologicheskikh funktsiy geosfer krupnykh gornopromishlennich regionov"*. Gomel, GGU im. F.Skorini, 2022, pp. 87-92.
13. Gabibov F.G., Salayeva Kh.B. Issledovaniye, analiz i dorabotka konstruktsiy kruglykh drenazhnykh trub s konstruktivnymi dopolneniyami dlya razvitiya ih otdelnykh funktsiy [Research, analysis and refinement of round drainage pipe designs with structural additions for the development of their individual functions] *Sbornik statey XXII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Rffektivniye stroitelniye konstruktsii: teoriya i praktika"*. Penza, Privolzhskiy Dom Znaniy, 2022, pp. 38-48.

14. Gabibov F.G., Salayeva Kh.B. Inzhenerniy analiz kruglih drenazhnykh trub i dopolnyayushih ih tehnikeskikh elementov v konstruktsiyah gorizontalnogo drenazha [Engineering analysis of round drainage pipes and their complementary technical elements in horizontal drainage structures] *Materiali XII Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nedra Kalmikii unikalni i interesni"*, Elista, Izdatelstvo Kalmitskogo universiteta, 2022, pp. 173-182.

15. Spangler M.G. Structural design of flexible pipe culverts // Bull. № 153, IEES, 1941.

16. Marston A. The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments // Bull. 96, IEES, - 1930.

17. Kleyn G.K. Raschet trub, ulozhennykh v zemle. [Calculation of pipes laid in the soil]. Moscow, Gosstrojizdat, 1957, 196 p.

18. Dzhafarov G.M. Issledovaniye intensivnosti raspredeleniya reaktsiy po opornoй poverhnosti i yeyo vliyaniya na napryazhennoye sostoyaniye drenazhnykh trub [Investigation of the intensity of the distribution of reactions over the support surface and its effect on the stress state of drainage pipes] *Trudi Azerbaydzhanskogo NII vodnih problem. Vipusk 1*, Baku, 1968.

19. Kleyn G.K. Raschet podzemnykh truboprovodov. [Calculation of underground pipelines]. Moscow, Strojizdat, 1969, 240 p.

20. Gorbunov-Posadov M.I., Malikova T.A., Solomin V.I. Raschet konstruktsiy na uprugom osnovanii. [Calculation of structures on an elastic base]. Moscow, Strojizdat, 1984, 679 p.

21. Vlasov V.Z., Leontyev N.N. Balki, pliti i obolochki na uprugom osnovanii. [Beams, plates and shells on an elastic base]. Moscow, Fizmatgiz, 1960, 491 p.